

## ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

По разработанной авторами классификации исследуются пять структур по критерию быстродействия. Максимуму ударной мощности соответствует минимум продолжительности рабочего цикла. Приводятся математические модели их решения для пяти структур, а также расчетные схемы ударных механизмов этих структур.

На рисунке [1] представлена циклограмма сил рассматриваемого механизма.

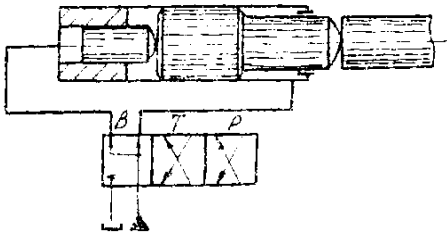


Рисунок 1. Схема ударного механизма структуры «В»

Механизм работает следующим образом. В первой фазе под действием разности усилия взвода  $F_{\Delta/B}$  и усилия рабочего хода  $F_{P/B}$ , действующих на боек, происходит взвод бойка, осуществляющийся до тех пор, пока орган управления на отключит камеру взвода от напорной магистрали. После этого происходит торможение бойка под действием усилия торможения  $F_{TP/B}$ , равного  $F_{P/B}$ , до полной остановки бойка. Затем начинается рабочий ход под действием рабочего усилия  $F_{P/B}$  до соударения бойка с хвостовиком инструмента. Причем после окончания работы хода орган управления соединяет камеру взвода с напорной магистралью.

Таким образом, рабочий цикл ударника состоит из трех фаз, а математическая модель его с учетом сделанных ранее допущений может быть записана в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x_{B/B}}{dt^2} &= \frac{F_{B/B} - F_{P/B}}{m}, \quad x = 0 \\ &V = 0 \quad \text{при } t = 0; \\ \frac{d^2 x_{T/B}}{dt^2} &= \frac{F_{P/B}}{m}, \quad x = 0 \\ &V = V_{B/B} \quad \text{при } t = 0; \\ \frac{d^2 x_{P/B}}{dt^2} &= \frac{F_{P/B}}{m}, \quad x = 0 \\ &V = 0 \quad \text{при } t = 0; \\ &V = V_{уд} \quad \text{при } t = t_{P/B} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Решение математической модели представлено в таблице 1.

Приняв  $\frac{F_{P/B}}{F_{B/B}} = i$ , (2)

запишем условие синтеза ударного механизма

$$X_{B/B} + X_{T/B} = X_{P/B} \quad (3)$$

и, подставив в (3) входящие величины, получим

$$X_{B/B} = \frac{mV_{уд}^2}{2F_{B/B}} \quad (4)$$

С учетом (4) получим выражение для определения длительности рабочего цикла

$$T_{ц/в} = \frac{mV_{уд}^2}{F_{B/B}} * \frac{1 + \sqrt{1-i}}{i * \sqrt{1-i}} \quad (5)$$

Исследование функции (5) показывает, что она имеет минимум при

$$i = 0,75 \quad (6)$$

Тогда продолжительность рабочего цикла

$$T_{ц/в} = 3 \frac{mV_{уд}}{F_{P/B}} \quad (7)$$

Циклограмма сил, действующих в рассматриваемом ударном механизме, представлена на рисунке [1]. Ударник работает следующим образом.

В первой фазе происходит взвод бойка только под действием возмущающего воздействия  $F_{B/T}$ . Во второй фазе, помимо воздействия  $F_{B/T}$ , на боек налагается дополнительное воздействие  $F_{P/T}$ , больше первого по модулю и противоположно направленное – происходит процесс торможения бойка (рис. 2).

После остановки бойка возмущающее воздействие  $F_{B/T}$  с бойка снимается, и он начинает двигаться с ускорением до соударения с хвостовиком инструмента только под воздействием  $F_{P/T}$ .

Таким образом, рабочий цикл ударного механизма рассматриваемой структуры состоит из трех фаз, и в соответствии с этим, имея в виду принятие допущения, математическая модель ударника может быть записана в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x_{B/T}}{dt^2} &= \frac{F_{B/T}}{m}, \quad x = 0 \\ &V = 0 \quad \text{при } t = 0; \end{aligned} \right\}$$

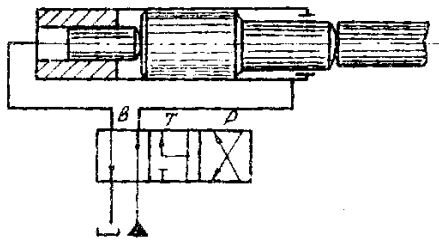


Рисунок 2. Схема ударного механизма структуры «IT»

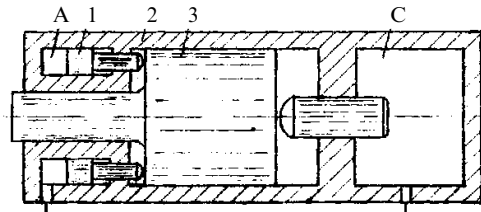


Рисунок 3. Схема ударного механизма структуры «IP»

$$\frac{d^2x_{Т/Т}}{dt^2} = \frac{F_{P/B} - F_{B/T}}{m}, \quad x = 0 \quad \left| \text{при } t = 0; \right.$$

$$V = V_0 \quad \left| \text{при } t = t_{T/T} \right. \quad (8)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_{P/T}}{m}, \quad x = 0 \quad \left| \text{при } t = 0; \right.$$

$$V = V_{уд} \quad \left| \text{при } t = t_{P/T} \right.$$

Решение математической модели (8) при начальных условиях приведено в таблице 2.

Условие синтеза ударного механизма запишется в виде:

$$X_{P/T} + X_{B/T} = X_{T/T} \quad (9)$$

Поставив в равенство (9) входящие величины из таблицы и имея в виду, что

$$\frac{F_{B/T}}{F_{P/T}} = i,$$

получим 
$$x_{B/T} = \frac{mV_{уд}^2}{2F_{P/T}}. \quad (10)$$

Поставив знание  $X_{B/T}$  в выражения для фазовых времен и суммировав их, получим для определения продолжительности рабочего цикла механизма структуры «IT»

$$T_{ц/Т} = \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{i(1-i)}} \right] \frac{mV_{уд}}{F_{P/T}}. \quad (11)$$

Исследование выражения (11) показывает, что оно имеет минимум при величине

$$i = 0,5 \quad (12)$$

и, следовательно, продолжительность рабочего цикла может быть определена из выражения

$$T_{ц/В} = 3 \frac{mV_{уд}}{F_{P/T}}. \quad (13)$$

На рисунке [1] представлена циклограмма сил, действующих на рассматриваемом механизме, а на рисунке 3 – возможный вариант конструктивной реализации.

Работа механизма осуществляется следующим образом. В камеру взвода постоянно включена напорная магистраль, поэтому в первой фазе происходит взвод бойка под действием силы  $F_{B/P}$  до тех пор, пока плунжеры 1 не упрутся своими буртиками в стенку корпуса 2. В это время в рабочую камеру С подается напор, и боек 3 начинает тормозиться под действием силы  $F_{P/P}$  до полной остановки, после чего начинает двигаться в сторону хвостовика инструмента до тех пор, пока не войдет в контакт с плунжерами 1. Боек продолжает двигаться в сторону хвостовика инструмента под воздействием разности сил  $F_{B/P}$  и  $F_{P/P}$  до соударения с ними.

Таким образом, рабочий цикл подразделяется на 4 фазы. В соответствии с этим математическая модель ударника рассматриваемой структуры может быть записана в виде:

$$\frac{d^2x_{B/P}}{dt^2} = \frac{F_{B/P}}{m}, \quad x = 0 \quad \left| \text{при } t = 0; \right.$$

$$\frac{d^2x_{TP}}{dt^2} = \frac{F_{P/P}}{m}, \quad x = 0 \quad \left| \text{при } t = 0; \right. \quad V = 0 \quad \left| \text{при } t = t_{TP}; \right.$$

$$\frac{d^2x_{P/P}}{dt^2} = \frac{F_{P/P}}{m}, \quad x = 0 \quad \left| \text{при } t = 0; \right. \quad (14)$$

$$\frac{d^2x_{P1/P}}{dt^2} = \frac{F_{P/P} - F_{B/P}}{m}, \quad x = 0 \quad \left| \text{при } t = 0; \right.$$

$$V = V_{уд} \quad \left| \text{при } t = t_{P/P} \right.$$

Решение математической модели представлено в таблице 3. Условие синтеза ударника может быть записано в виде:

$$X_{B/P} + X_{T/P} = X_{P/P} + X_{P1/P}. \quad (15)$$

Поставив в равенство (14) входящие в него величины из таблицы 3 и учитывая, что

$$\frac{F_{B/P}}{F_{P/P}} = i, \quad x_{B/P} = \frac{mV_{уд}^2}{2F_{P/P}}. \quad (16)$$

Таблица 1. Решение математической модели ударного механизма структуры «IB»

| Фаза рабочего цикла | Время  | Скорость  | Перемещение  |
|---------------------|--|---|--|
| Взвод               | $t_{B/B} = \sqrt{\frac{2mX_{B/B}}{F_{B/B} - F_{P/B}}}$         | $V_{B/B} = \sqrt{\frac{2(F_{B/B} - F_{P/B})X_{B/B}}{m}}$  | $X_{B/B}$  |
| Торможение          | $t_{P/B} = \sqrt{\frac{2mX_{B/B}(F_{B/B} - F_{P/B})}{F_{P1}}}$ | $V_{T/B} = V_{B/B} - \frac{F_{P/B}}{m} \Big _{t_{T/B}} 0$ | $X_{T/B} = \frac{X_{B/B}(F_{B/B} - F_{P/B})}{F_{P/B}}$ |
| Рабочий ход         | $t_{P/B} = \frac{mV_{уд}}{F_{P/B}}$                            | $V_{P/B} = \frac{F_{P/B}}{m} \Big _{t_{P/B}} 0$           | $X_{P/B} = \frac{mV_{уд}^2}{2F_{P/B}}$                 |

Таблица 2. Решение математической модели ударного механизма структуры «IT»

| Фаза рабочего цикла | Время  | Скорость   | Перемещение   |
|---------------------|--|--|---|
| Взвод               | $t_{B/T} = \sqrt{\frac{2mX_{B/T}}{F_{B/T}}}$               | $V_{B/T} = \sqrt{\frac{2F_{B/T}X_{B/T}}{m}}$                       | $X_{B/T}$   |
| Торможение          | $t_{T/T} = \sqrt{\frac{2mX_{B/T}}{(F_{P/T} - F_{B/T})^2}}$ | $V_{TK} = V_{B/T} = \frac{F_{P/T} - F_{B/T}}{m} \Big _{t_{T/T}} 0$ | $X_{T/T} = \frac{F_{B/T}}{F_{P/T} - F_{B/T}} X_{B/T}$ |
| Рабочий ход         | $t_{P/T} = \frac{mV_{уд}}{F_{P/T}}$                        | $V_{P/T} = \frac{F_{P/T}}{m} \Big _{t_{P/T}} 0$                    | $X_{P/T} = \frac{mV_{уд}^2}{2F_{P/T}}$                |

Таблица 3. Решение математической модели ударного механизма структуры «IP»

| Фаза рабочего цикла | Время  | Скорость   | Перемещение                                 |
|---------------------|--|--|---|
| Взвод               | $t_{B/P} = \sqrt{\frac{2mX_{B/P}}{F_{B/P}}}$                                     | $V_{B/P} = \sqrt{\frac{2F_{B/P}X_{B/P}}{m}}$                       | $X_{B/P}$                                   |
| Торможение          | $t_{T/P} = \sqrt{\frac{2mX_{B/P} * F_{P/B}}{F_{P/P}^2}}$                         | $V_{T/B} = V_{B/P} - \frac{F_{P/B}}{m} \Big _{t_{T/B}} 0$          | $X_{T/P} = \frac{F_{B/P}}{F_{P/P}} X_{B/P}$ |
| Рабочий ход (1)     | $t_{P/P} = \frac{mX_{B/P}F_{B/P}}{F_{P/P}^2}$                                    | $V_{P/P} = \sqrt{\frac{2F_{B/P}X_{B/P}}{m}}$                       | $X_{P/P} = \frac{F_{B/P}}{F_{P/P}} X_{B/P}$ |
| Рабочий ход (2)     | $t_{P1/P} = m \frac{V_{уд} \sqrt{\frac{2F_{B/P}X_{B/P}}{m}}}{F_{P/P} - F_{B/P}}$ | $V_{P1/P} = V_{P/P} + \frac{F_{P/P}F_{B/P}}{m} \Big _{t_{P1/P}} 0$ | $X_{P1/P} = X_{B/P}$                        |

Поставив значение  $X_{в/р}$  в выражения для определенных фазовых времен и суммировав их, получим выражение для определения продолжительности рабочего цикла ударного механизма структуры «IP»

$$T_{ц/р} = \frac{mV_{уд}}{F_{р/р}} * \frac{1 + 2i + 2\sqrt{i}\sqrt{1-i}}{\sqrt{i}(1+\sqrt{i})}. \quad (17)$$

Анализ выражения (17) показывает, что оно имеет минимум при значении  $i = 1$  (18).

Тогда продолжительность рабочего цикла можно выразить величиной

$$T_{ц/р} = 3,5 \frac{mV_{уд}}{F_{р/р}}. \quad (19)$$

Циклограмма сил, действующих в ударном механизме (рис. 4) структуры «2ТР», представлена на рисунке [1]. Механизм работает следующим образом. Под действием давления жидкости, постоянно подаваемой в камеру взвода, боек взводится, причем только под действием силы взвода  $F_{в2тр}$ . Через определенное время органом управления камера рабочего хода сообщается с напорной магистралью, и в ней возникает возмущающее воздействие  $F_{р2тр}$ , большее по модулю, чем  $F_{в2тр}$ , и противоположно ей направленные. Под действием разности этих воздействий боек начинает тормозиться. После остановки он начинает двигаться в направлении хвостовика инструмента до соударения с ним под действием той же разности возмущающих воздействий (рис. 4).

Таким образом, рабочий цикл ударника может быть описан тремя фазами, а математическая модель его записана в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_{в2тр}}{dt^2} &= \frac{F_{в2тр}}{m}, \quad x=0, \quad V=0 \text{ при } t=0; \\ \frac{d^2x_{р2тр}}{dt^2} &= \frac{F_{р2тр} - F_{в2тр}}{m}, \\ x &= 0 \text{ при } t=0; \quad V = V_{в2тр} \text{ при } t = t_{р2тр}; \end{aligned} \quad (20)$$

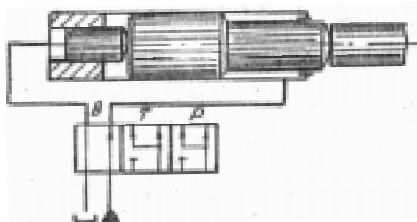


Рисунок 4. Схема ударного механизма структуры «2ТР»

$$\frac{d^2x_{р2тр}}{dt^2} = \frac{F_{р2тр} - F_{в2тр}}{m}, \quad x=0, \quad V=0 \text{ при } t=0;$$

$$V = V_{уд} \text{ при } t = t_{р2тр}.$$

Решение математической модели представлено в таблице 5. Условие синтеза ударного механизма может быть записано в виде:

$$X_{в2тр} + X_{р2тр} = X_{р2тр}. \quad (21)$$

Поставив в равенство (21) входящие в него величины из таблицы 4, получим

$$X_{в2тр} = \frac{mV_{уд}^2}{2F_{р2тр}}. \quad (22)$$

Подставив значение  $X_{в2тр}$  в выражение для определения фазовых времен и имея в виду, что  $\frac{F_{в2тр}}{F_{р2тр}} = i$ , суммировав их, получим выражение для определения продолжительности рабочего цикла

$$T_{ц2тр} = \frac{mV_{уд}}{F_{р2тр}} * \frac{1 + \sqrt{i}}{\sqrt{i}(1-i)}. \quad (23)$$

Анализ выражения (23) показывает, что оно имеет при  $i = 0,25$  (24).

В этом случае продолжительность рабочего цикла можно представить в виде:

$$T_{ц2тр} = 4 \frac{mV_{уд}}{F_{р2тр}}. \quad (25)$$

Работа ударного механизма (рис. 5) осуществляется следующим образом. Рабочая жидкость попадет в камеру А. Под действием давления на поверхность В бойка 1 и Р плунжера 2 образуются возмущающие воздействия  $F_{в2тро}$  и  $F_{р2тро}$  соответственно. Под действием силы  $F_{в2тро}$  осуществляется взвод бойка до момента, когда он малой ступенью своего дифференциального отверстия не зацепит буртик рабочего плунжера 2. С этого момента боек начинает перемещаться под влиянием возмущающего воздействия, равного разности сил  $F_{в2тро}$  и  $F_{р2тро}$ , связанных между собой соотношениями [1].

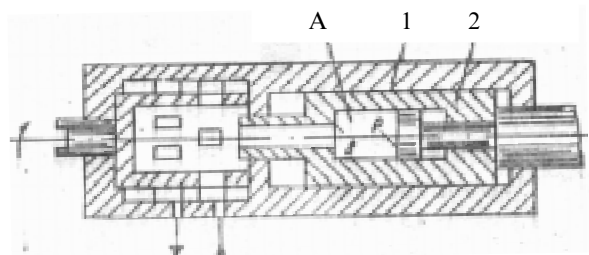


Рисунок 5. Схема ударного механизма структуры «2ТРО»

$$F_{в2тпо} > F_{р2тпо}; F_{в2тпо} = iF_{р2тпо}. \quad (26)$$

При этом движение будет происходить с замедлением до полной остановки бойка, т. е. будет осуществляться процесс его торможения. После остановки боек под действием той же разности сил начнет двигаться с ускорением в сторону хвостовика инструмента и будет двигаться до тех пор, пока плунжер своим передним концом не обопрется на хвостовик.

В этот момент золотник энергораспределительного устройства 3 соединяет камеру А со сливной магистралью, а боек, вытесняя из камеры на слив, будет двигаться по инерции до соударения с хвостовиком инструмента.

Таким образом, рабочий цикл ударного механизма может быть представлен четырьмя фазами, одна из которых – инерционная. Математическая модель его может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_{в2тпо}}{dt^2} &= \frac{F_{в2тпо}}{m}, \quad x = 0 \Big| \text{при } t = 0; \\ \frac{d^2x_{т2тпо}}{dt^2} &= \frac{F_{р2тпо} - F_{в2тпо}}{m}, \\ x &= 0 \Big| \text{при } t = 0; \quad V = V_{в2тпо} \Big| \text{при } t = 0; \quad V = 0 \Big| \text{при } t = t_{т2тпо}; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_{р2тпо}}{dt^2} &= \frac{F_{р2тпо} - F_{в2тпо}}{m}, \\ x &= 0 \Big| \text{при } t = 0; \quad V = V_{уд} \Big| \text{при } t = t_{р2тпо}. \end{aligned}$$

Решение математической модели (27) представлено в таблице 5. Условие синтеза ударного механизма может быть записано в виде:

$$X_{в2тпо} + X_{т2тпо} = X_{р2тпо} + X_{и2тпо}. \quad (28)$$

Таблица 4. Решение математической модели ударного механизма структуры «2ТР»

| Фаза рабочего цикла | Время  | Скорость   | Перемещение  |
|---------------------|--|--|--|
| Взвод               | $t_{в2тр} = \sqrt{\frac{2mX_{в2тр}}{F_{в2тр}}}$                        | $V_{в2тр} = \sqrt{\frac{2F_{в2тр}X_{в2тр}}{m}}$                          | $X_{в2тр}$   |
| Торможение          | $t_{т2тр} = \sqrt{\frac{2mX_{в2тр}F_{в2тр}}{(F_{р2тр} - F_{в2тр})^2}}$ | $V_{т2тр} = V_{в2тр} - \frac{F_{р2тр} - F_{в2тр}}{m} t \Big _{t_{т2тр}}$ | $X_{т2тр} = \frac{X_{в2тр}iF_{в2тр}}{F_{р2тр} - F_{в2тр}}$ |
| Рабочий ход         | $t_{р2тр} = \frac{mV_{уд}}{F_{р2тр} - F_{в2тр}}$                       | $V_{р2тр} = \frac{F_{р2тр} - F_{в2тр}}{m} t \Big _{t_{р/в}}$             | $X_{в2тр} = \frac{mV_{уд}^2}{2(F_{р2тр} - F_{в2тр})}$      |

Таблица 5. Решение математической модели ударного механизма структуры «2ТРО»

| Фаза рабочего цикла | Время  | Скорость   | Перемещение  |
|---------------------|--|--|--|
| Взвод               | $t_{в2тпо} = \sqrt{\frac{2mX_{в2тпо}}{F_{в2тпо}}}$           | $V_2 = \sqrt{\frac{2F_{в2тпо}X_{в2тпо}}{m}}$                           | $X_{в2тпо}$  |
| Торможение          | $t_{т2тпо} = \sqrt{\frac{2miX_{в2тпо}F_{в2тпо}}{F_{в2тпо}}}$ | $V_{т2тпо} = V_{в2тпо} - \frac{F_{р2тпо}(1-i)}{m} t \Big _{t_{т2тпо}}$ | $X_{т2тпо} = \frac{iX_{в2тпо}}{1-i}$<br>$F_{в2тпо} = iF_{р2тпо}$ |
| Рабочий ход         | $t_{р2тпо} = t_{т2тпо}$                                      | $V_{р2тпо} = \sqrt{\frac{2iX_{в2тпо}F_{р2тпо}}{m}}$                    | $X_{р2тпо} = \frac{F_{р2тпо}}{2m}(1-i)$<br>$t \Big _{t_{р2тпо}}$ |
| Рабочий ход         | $t_{р2тпо} = \frac{mV_{уд}}{X_{в2тпо}}$                      | $V_{р2тпо} = V_{уд} = const$   | $X_{р2тпо} = X_{в2тпо}$  |

Подставляя в выражение (28) входящие величины из таблицы 5, получим

$$X_{в2тро} = \frac{mV_{уд}^2}{2iF_{р2тро}}. \quad (29)$$

Подставив значение  $X_{в2тро}$  в выражение для определения фазовых времен и суммировав их, получим выражение для определения продолжительности рабочего цикла ударного механизма

$$T_{ц2тро} = \frac{mV_{уд}}{F_{р2тро}} * \frac{i+3}{2i(1-i)}. \quad (30)$$

Анализ функции  $T_{ц} = T_{ц}(i)$  (30) показывает, что оно имеет минимум при значении  $i=0,414$ , а продолжительность рабочего цикла ударного механизма структуры «2ТРО» может быть записана в виде:

$$T_{ц2тро} = 6,96 \frac{mV_{уд}}{F_{р2тро}}. \quad (31)$$

Для анализа пяти рассмотренных структур вводятся коэффициент быстродействия  $K_б = \frac{1}{T_{ц}}$  и коэффициент конструктивного воп-

лощения, представляющий собой отношение ударной мощности к суммарной площади рабочих поверхностей

$$K_k = \frac{N_{уд}}{w(1+i)} = \frac{A * K_б}{w(1+i)}. \quad (32)$$

В результате анализа рабочих циклов в структурных схемах получены аналитические выражения для коэффициентов, которые в общем виде имеют вид:

$$K_б = \frac{P * w}{V * m} f_б(i); \quad (33)$$

$$K_k = \frac{P * V}{2} f_k(i). \quad (34)$$

Параметры  $w$ ,  $m$ ,  $V$  и  $P$  остаются неизменными для всех схем, следовательно, коэффициенты быстродействия и компактности конструктивного воплощения определяются соответственно целевыми функциями  $f_б(i)$ ,  $f_k(i)$ .

Сравнение результатов анализа рассмотренных структур показывает, что наилучшими являются механизмы структуры «О», «2Р», «1Т».

#### Список использованной литературы:

1. Павлов А.С. Оптимальный синтез высокочастотных гидравлических ударных механизмов // Вестник ОГУ, 2002, №5, С. 155-158